УДК 647.047

Е.Е. Шишкина, А.Г. Гороховский
(УГЛТУ, г. Екатеринбург, РФ), elenashishkina@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ КАПИЛЛЯРНОЙ ПРОВОДИМОСТИ ДРЕВЕСИНЫ НА НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ ВЛАГОПЕРЕНОС

THE IMPACT OF CAPILLARY CONDUCTIVITY OF WOOD IN NON-ISOTHERMAL MOISTURE TRANSFER

В статье подробно рассматривается природа явления термовлагопроводности древесины и доказывается гипотеза о невозможности движения влаги по капиллярам внутрь древесины под действием градиента температуры вследствие практически полного отсутствия капиллярной проводимости в данном направлении.

The article details the nature of the phenomenon of heat and moisture transfer of wood and prove the hypothesis of the impossibility of movement of moisture through the capillaries into the wood under the influence of a temperature gradient in consequence of the almost complete absence of capillary conduction in this direction.

Из теории сушки известно, что такое явление, как термовлагопроводность [1], может создавать дополнительный поток влаги, если градиент температуры отрицателен, и таким образом ускорять процесс влагоудаления (сушки). Но если градиент температуры положителен, термовлагопроводность может существенно тормозить влагоудаление. При этом совершенно очевидно, что такой тормозящий эффект может распространяться только на процесс удаления жидкостной влаги (вплоть до его полной остановки). При этом на молекулярный и молярный перенос парообразной влаги внутри капиллярно-пористого тела это не распространяется вследствие разной физической природы этих явлений [1–4].

Тормозящий эффект термовлагопроводности (неизотермический поток) может уменьшить и даже остановить жидкостный поток, возникший по причине достаточной величины расклинивающего давления, но сделать его отрицательным он не может. Это связано со следующими объективными явлениями [5, 6].

Движение смачивающей жидкости в одиночном сквозном цилиндрическом капилляре под действием сил поверхностного натяжения при ламинарном режиме определяется уравнением [5]:

$$\frac{d^2 l}{dt^2} + \frac{1}{l}\left(\frac{dl}{dt}\right)^2 + \frac{8\eta\, dl}{r^2 \rho_ж\, dt} + g \cdot \sin\varphi - \frac{2\sigma\cos\Theta}{r\rho_ж l} = 0\,, \qquad (1)$$

где η – коэффициент вязкости;

g – ускорение свободного падения;

φ – угол наклона капилляра;

σ – поверхностное натяжение;

θ – угол смачивания.

В линейном приближении, пренебрегая в уравнении (1) двумя первыми членами ввиду их малости, получаем для горизонтального капилляра ($\varphi = 0$)

$$\frac{dl}{dt} = \frac{2\sigma\cos\Theta r}{8\eta l}, \qquad (2)$$

для вертикального капилляра ($\varphi = 90^0$):

$$\frac{dl}{dt} = \frac{r^2}{8\eta l}\left(\frac{2\sigma\cos\Theta r}{8\eta l} - \rho_ж g l\right), \qquad (3)$$

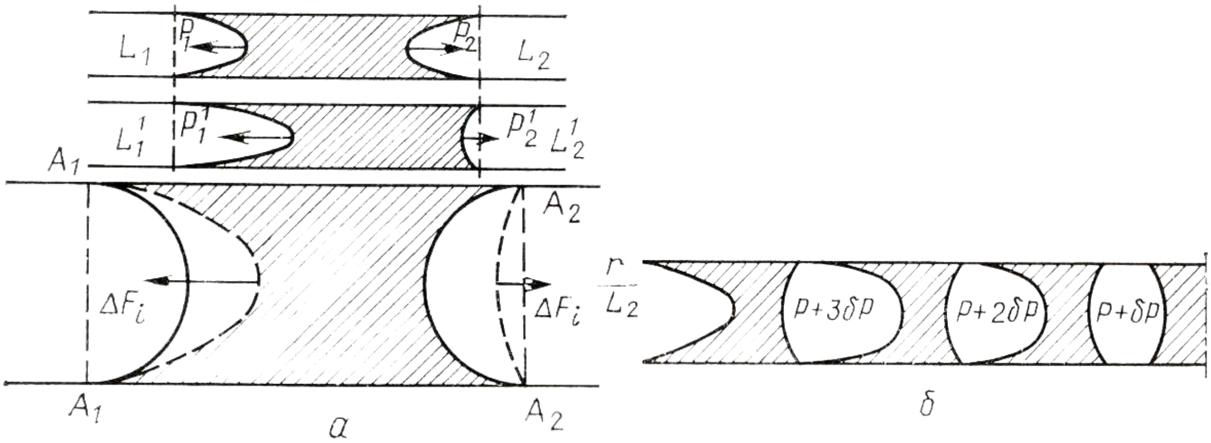
где l – длина столбика жидкости в капилляре;

t – время движения;

$\rho_{ж}$ – плотность жидкости;

r – радиус капилляра.

Уравнения движения жидкости (1–3) не учитывают влияния защемленного воздуха [4]. При появлении пузырьков воздуха при движении жидкости в древесине существенную роль будет иметь эффект Жамена (рисунок 1). Он заключается в том, что при несплошном заполнении капилляров образовавшиеся замкнутые воздушные включения вызывают резкое увеличение гидродинамического сопротивления среды. Такая картина наблюдается при движении газированной жидкости, например нефти, сквозь пористую среду [7]. Исследованию влияния эффекта Жамена на движение пасоки по сосудам живой древесины были посвящены классические работы академика Е.Ф. Вотчала [8], к сожалению, не получившие в дальнейшем необходимого развития.



Эффект Жамена (*а* – мениски капилляра; *б* – четки Жамена)

По существу эффект Жамена есть интегральное выражение влияния внутренних граничных условий на движение жидкости через сложную капиллярно-пористую среду.

Мы можем описать фильтрацию жидкости при ее движении через пористую среду законом Дарси:

$$\bar{u} = \frac{c}{\eta}\frac{dP}{dx}, \tag{4}$$

где с – коэффициент проницаемости;

$\frac{dP}{dx}$ – градиент давления.

Или при ее течении по капиллярам формулой Пуазейля:

$$\bar{u} = \frac{r^2}{8\eta}\frac{dP}{dx}. \tag{5}$$

При достаточно стабильной температуре коэффициент вязкости не может изменять свою величину в зависимости от структуры среды. Изменение скорости $\bar{u}$ фильтрации жидкости можно отнести на счет появления инородной фазы – газовых пузырьков, вызывающих изменение внутренних граничных условий среды. Это наиболее ясно видно из закона Дарси: при неизменных η и $\frac{dP}{dx}$ [7] происходит уменьшение $\bar{u}$ за счет уменьшения эффективного значения коэффициента проницаемости.

Формула Пуазейля в ее стандартном виде вообще не применима для случая несплошного течения жидкости и с учетом прерывности может быть представлена в виде [5]:

$$\overline{u} = \frac{r^2}{8\eta}\frac{dP}{dx}\frac{1}{1+\alpha}, \tag{6}$$

где α – поправочный коэффициент, зависящий от количества газовых пузырьков, коэффициента поверхностного натяжения по отношению к материалу стенок капилляра. Следует отметить, что формально уменьшение $\overline{u}$ можно также отнести за счет увеличения эффективного значения коэффициента вязкости η жидкости, вследствие ее «газирования», считая при этом коэффициент проницаемости c неизменным по величине.

Однако, по мнению Н.И. Оснача [5, 9], уменьшение скорости фильтрации при наличии четок Жамена в древесных капиллярах происходит за счет совместного воздействия как уменьшения проводимости, так и увеличения эффективного значения вязкости, но со значительным превалированием первого фактора.

Пузырек газа, образовавшийся в силу тех или иных причин в капилляре, будет оказывать значительное сопротивление движению жидкости. Цепочка из пузырьков – четки Жамена – может полностью закрыть капилляр.

Допустим теперь, что в капилляре образовалась цепочка четок Жамена, содержащая n пузырьков. Рассмотрим в ней i-й газовый пузырек.

В динамическом режиме левый и правый мениски будут иметь различную кривизну (рисунок 1). Определим величину добавочного сопротивления, создаваемого на границах i-й капли жидкости.

Давление P_i, которое в литературе обычно называют Лапласовым (по имени известного французского ученого*), в каждой точке искривленной поверхности будет направлена в сторону центра кривизны соответствующей элементарной площадки $\Delta\alpha_i$.

При этом полная сила Лапласова давления по поверхности мениска A_1A_1 равна

$$f' A_1 A_1 = \iint \sigma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)_{11}, \tag{7}$$

где $r_1 r_2$ – соответственно радиусы наименьшей и наибольшей кривизны данного элемента поверхности.

Для поверхности мениска A_2A_2 сила Лапласова давления равна

$$f'' A_2 A_2 = \iint \sigma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)_{11} \sin\nu_{11} d\alpha. \tag{8}$$

Таким образом, сила противодавления связана с i-й каплей при продвижении последней:

$$\Delta F_i = f' A_1 A_1 - f'' A_2 A_2 = \iint \sigma \left\{ \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)_1 \sin \nu_1 - \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)_{11} \sin \nu_{11} \right\} d\alpha, \tag{9}$$

где ν_1, ν_{11} – угол между нормалью к поверхности мениска и осью капилляра (соответственно поверхности менисков A_1A_1 и A_2A_2).

Для вычисления (9) необходимо знать подынтегральное выражение как функцию независимых переменных, которая будет весьма сложным образом изменяться в процессе деформации мениска при его движении вместе с жидкостью по капилляру. В результате выражение (9) становится практически невычисляемым.

Однако оценить величину противодавления возможно.

Допустим в первом приближении, что каждый пузырек вносит некоторое дополнительное сопротивление

$$\delta P_i \approx \frac{2\sigma}{r_i}, \tag{10}$$

где r_i – величина среднего радиуса кривизны мениска капли.

Когда вся цепочка начнет двигаться, то полное капиллярное противодавление будет $\Delta P_{доп} \approx n \dfrac{2\sigma}{r_i}$.

Для древесных капилляров (модель коллоидного капиллярно-пористого тела [10], эквивалентный радиус ранней трахеиды сосны) характерен размер

$$r_i = 2 \cdot 10^{-5}\ м,$$

поверхностное натяжение жидкости при $T = 353\ ^0$К

$$\sigma_i \approx 60 \cdot 10^{-3}\ Н \cdot м.$$

Тогда противодавление, создаваемое одним пузырьком,

$$\delta P_i \approx 6000\ \ Н., \tag{11}$$

Исследователи [5, 6] осторожно предполагают, что наличие 50–100 пузырьков воздуха в капилляре делает его непроницаемым.

Однако мы можем утверждать, что наличие уже одного пузырька делает капилляр непроницаемым (при движении жидкости внутрь), так как с учетом площади капилляра противодавление составляет

$$\delta P_д \approx 5 \cdot 10^{12}\ Н \cdot м^2 \approx 5 \cdot 10^7\ ати.$$

Авторы [6] утверждают, что тиллы в сосудах, старческие сдвиги торуса, замкнутые включения защемленного воздуха – все это говорит о том, что для решения вопроса кинетики движения жидкости по древесине при неполном насыщении ее пор модель должна состоять из системы тупиковых капилляров.

Общий вывод по работе

Гипотеза о невозможности движения влаги по капиллярам внутрь древесины под действием градиента температуры подтверждается.

Библиографический список

1. Лыков А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – М.: Госэнергоиздат, 1950. – 416 с.
2. Лыков А.В. Явление переноса в капиллярно-пористых телах / А.В. Лыков. – М.: ГИТТЛ, 1954. – 296 с.
3. Лыков А.В. Кинетика и динамика процессов сушки и увлажнения / А.В. Лыков. – М.: Гизлегром, 1938. – 590 с.
4. Лыков А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. М.: Энергия, 1968. – 470 с.
5. Оснач Н.А. Проницаемость и проводимость древесины / Н.А. Оснач. – М.: Лесн. пром-сть, 1964. – 182 с.
6. Патякин В.И. Техническая гидродинамика древесины / В.И. Патякин, Ю.Г. Тишин, С.М. Базаров. – М.: Лесн. пром-сть, 1990. – 304 с.
7. Требин Ф.А. Нефтепроницаемость песчаных коллекторов / Ф.А. Требин. – М.: Гостоптехиздат, 1945. – 139 с.
8. Вотчал Е.Ф. О движении пасоки в растениях / Е.Ф. Вотчал. – М.: Изд. Кушнерев и К°, 1897. – 390 с.
9. Оснач Н.А. О проницаемости древесины / Н.А. Оснач // Деревообрабатывающая промышленность. – 1961. – № 3. – С. 11–13.
10. Гороховский А.Г. Технология сушки пиломатериалов на основе моделирования и оптимизации процессов тепломассопереноса в древесине: дис. … д-ра техн. наук: 05.21.05: защищена 22.10.08: утв. 08.05.09 / Гороховский Александр Григорьевич. – СПб.: СПбГЛТА им. С.М. Кирова, 2008. – 263 с.

* Laplace P.S. Theorie de l'action capillare. Pp. 1806–1807 (Supplement au X livre du Traite de mecanique celeste) (по [5]